

A kontaktszög meghatározásának geometriai módszerei marásnál

Geometric methods of determining the cutter engagement for milling

JACSÓ Ádám tudományos segédmunkatárs, Dr. MÁTYÁSI Gyula címzetes egyetemi tanár,
Dr. SZALAY Tibor egyetemi docens

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Gyártástudomány és –technológia Tanszék

Cím: 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.

Telefon: 06/1-463-1875, Fax: 06/1-463-3176, E-mail: jacso@manuf.bme.hu, Honlap: www.manuf.bme.hu

Összefoglaló

A 2.5D-s nagyolási műveleteknél napjainkban is elterjedten használják a kontúrpárhuzamos marási stratégiát. Az egyenközű szerszámpályák esetén azonban a szerszám terhelése erősen függ a kontúr alakjától. A cikkben bemutatjuk, hogy különböző kontúrmarási viszonyok esetén hogyan írható le a munkadarab és a szerszám kapcsolódási viszonyait jellemző kontaktszög értéke.

Kulcsszavak: 2.5D marás, kontúrpárhuzamos stratégia, kontaktszög, szerszámterhelés

Abstract

Contour parallel milling strategy is still widely used in 2.5D roughing operations. However, in the case of equidistant tool paths, the tool load strongly depends on the contour's shape. The paper presents how the cutter engagement can be determined for different contour milling conditions to describe the interaction between the workpiece and the milling tool.

Keywords: 2.5D milling, contour-parallel strategy, cutter engagement angle, tool load

1. BEVEZETÉS

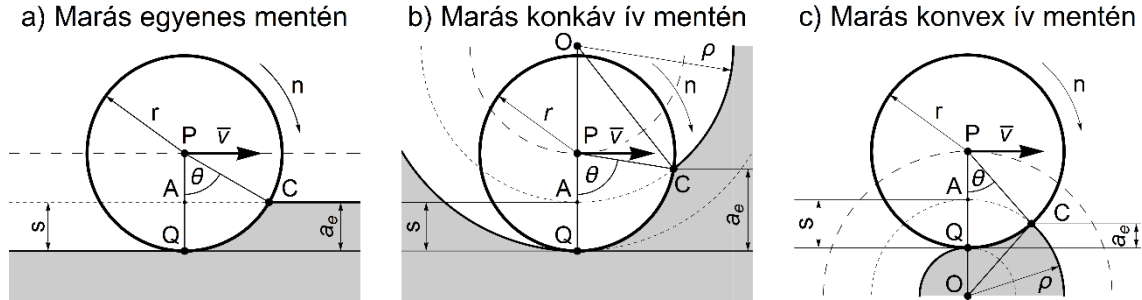
Bár a korszerű CAM rendszerekben léteznek olyan nagyoló ciklusok, amelyek a szerszámterhelést is figyelembe veszik a szerszámpálya tervezésekor, továbbra is elterjedten alkalmaznak pusztán geometriai számításokon alapuló szerszámpályákat. Napjainkban az egyik legáltalánosabb 2.5D-s nagyolási stratégiának továbbra is a kontúrpárhuzamos stratégia számít, ahol a kontúrral ekvidisztáns görbék alkotják a szerszámpályát. Azonban ennél a stratégiánál a szerszám radiális bemerülése (a_e) a konvex ívek mentén lecsökken, a konkáv ívek mentén megnövekszik, azaz értéke erősen függ a kontúr alakjától. A szerszám radiális bemerülésének jellemzésére a legalkalmasabb paraméter a fogásban lévő ívhez tartozó középponti szög, az ún. kontaktszög. Amennyiben a kontaktszög alakulása ismert a pálya mentén, az előtolási sebesség szabályozásával a szerszám terhelése az optimális érték környezetében tartható, ami létfontosságú a megmunkálás hatékonyságának szempontjából. Cikkünkben bemutatjuk a kontaktszög meghatározásához szükséges geometriai összefüggéseket. A levezetések során a kontúrpárhuzamos szerszámpálya szakaszaira külön egységekként fogunk tekinteni, tehát az összefüggések általános kontúrmarási műveletekre is általánosíthatóak. Továbbá röviden ismertetjük azt is, hogy milyen lehetőségek vannak az állandó kontaktszöget biztosító szerszámpályák tervezésére, amellyel az előtolási sebesség szabályozása nélkül is állandó értéken tartható a szerszámterhelés nagysága.

2.5D marás esetén a kontaktszög elemzéséhez nincs szükség a szerszám geometriájának pontos ismeretéhez, a számításokat elegendő a megmunkálás síkjában vett metszetben elvégezni. A valóságban a szerszám élei ugyan ciklois pályát járnak be, azonban a gyakorlatban alkalmazott előtolás értékek mellett a köríves közelítés okozta hiba elhanyagolható, így a számítások során a szerszám egy körlemez-ként modellezhető. A kontaktszög meghatározásának menete alapvetően attól függ, hogy a vizsgált pont környezetében a kontúr görbülete hogyan alakul. Ezért érdemes különválasztani azt a két

esetet, amikor a kontúr görbülete állandó (egyenes és körív menti kontúr esetén), és amikor a kontúr görbülete változik (általános kontúr esetén).

2. A KONTAKTSZÖG ALAKULÁSA ÁLLANDÓ GÖRBÜLETŰ KONTÚR MENTÉN

Először vizsgáljuk meg a stacionárius esetet, amikor a szerszám állandó körülmények között dolgozik, vagyis amikor a kontaktszög állandó marad a pálya mentén. Állandó görbületű kontúrszakaszok esetén ez a feltétel épp a kontúrpárhuzamos szerszám pályáknál teljesül (lásd 1. ábra), azonban az ábra jól mutatja, hogy a kontúr görbületi sugarától függően ugyanahhoz az oldallépéshez más-más kontaktszög tartozik.



1. ábra A kontaktszög alakulása állandó görbületű kontúrszakaszok esetén

Jelölje P a szerszám középpontjának pillanatnyi helyzetét, C a szerszám körvonalának és a kontúr még nem lemunkált szakaszának a metszéspontját, azaz a szerszámél belépési pontját, Q a szerszámél kilépési pontját, \vec{v} az előtolás irányát, azaz a szerszám pálya P pontbeli érintőjét, r [mm] a szerszám sugarát, s [mm] az oldallépés nagyságát és ρ [mm] a kontúr görbületi sugarát! Ekkor a kontaktszög a \vec{PQ} és a \vec{PC} vektorok által bezárt szöggel egyenlő: $\theta = \angle QPC$.

Egyenes kontúr esetén a kontaktszög értéke közvetlenül kifejezhető az oldallépés nagyságából, ha egy szögfüggvény segítségével felírjuk az APC derékszögű háromszög két oldala közötti kapcsolatot: $\cos(\angle APC) = |\vec{PA}|/|\vec{PC}|$. A behelyettesítéseket ($\angle APC = \theta$, $|\vec{PA}| = r - s$, $|\vec{PC}| = r$) és az átrendezést követően az alábbi összefüggést kapjuk:

$$\theta(s) = \arccos\left(1 - \frac{s}{r}\right) \quad (1)$$

Illetve megadható az is, hogy adott nagyságú kontaktszöget mekkora oldallépéssel érhetünk el:

$$s(\theta) = r(1 - \cos \theta) \quad (2)$$

Konkáv ívek esetére Kramer vezette le [1] a kontaktszöget leíró képletet a koszinusztétel felhasználásával az OPC háromszög alapján:

$$|\vec{OC}|^2 = |\vec{PO}|^2 + |\vec{PC}|^2 - 2|\vec{PO}||\vec{PC}|\cos(\angle OPC) \quad (3)$$

A behelyettesítések ($|\vec{OC}| = \rho$, $|\vec{PO}| = \rho + s - r$, $|\vec{PC}| = r$, $\angle OPC = \pi - \theta$), az átrendezés, majd az egyszerűsítések elvégzését követően az alábbi összefüggést kapjuk a kontaktszög értékére:

$$\theta(s, \rho) = \pi - \arccos\left(\frac{2r^2 + 2(\rho + s)(s - r) - s^2}{2r(\rho + s - r)}\right) \quad (4)$$

Konvex ívek esetére a (4)-es összefüggés nem érvényes, viszont a Kramer-féle szerkesztés itt is alkalmazható. Ekkor az alábbi behelyettesítések végezhetőek el a (3)-as összefüggésben: $|\vec{OC}| = \rho$, $|\vec{PO}| = \rho - s + r$, $|\vec{PC}| = r$, $\angle OPC = \theta$. Így az átrendezést és az egyszerűsítéseket követően az alábbi kifejezést kapjuk:

$$\theta(s, \rho) = \arccos\left(\frac{2r^2 + 2(\rho - s)(r - s) - s^2}{2r(\rho - s + r)}\right) \quad (5)$$

Chan és Choy [2] az előző összefüggések, valamint az $\arccos(x) = \pi - \arccos(-x)$ azonosság felhasználásával felírtak egy uniformizált összefüggést is, amely konvex és konkáv ívek esetén egyaránt használható:

$$\theta(s, \rho) = \arccos \left(1 - \frac{s}{r} + k \frac{s \left(r - \frac{1}{2}s \right)}{r \left(\rho - k s + k r \right)} \right) \quad (6)$$

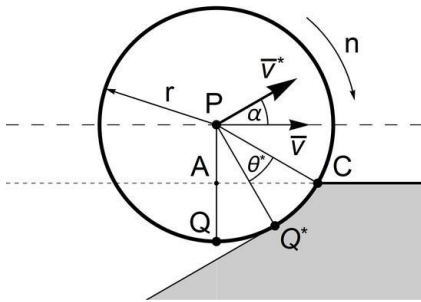
ahol konkáv ívek esetén $k = -1$, konvex ívek esetén $k = 1$. Egyenes esetén, amikor a görbületi sugár végtelennek tekinthető ($\rho \rightarrow \infty$), a zárójelen belüli összegzés utolsó tagja nulla lesz, így visszkapjuk az (1)-es összefüggést. Vagyis az állandó görbületű kontúrok ekvidisztáns pályán történő megmunkálásánál a (6)-os összefüggés valóban általánosan alkalmazható a kontaktszög leírására.

Arra vonatkozó levezetést viszont nem találtunk a szakirodalomban, hogy mekkora nagyságú oldallépés esetén alakul ki az alkalmazni kívánt kontaktszög. Ezt pótolandó a (3)-as összefüggés alapján meghatároztuk azt a formulát, amely konvex és konkáv ívek mentén is alkalmazható:

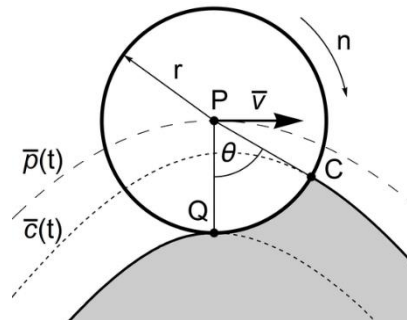
$$s(\theta, \rho) = r(1 - \cos\theta) + k\rho - k\sqrt{\rho^2 + r^2(\cos^2\theta - 1)} \quad (7)$$

Az előzők során bemutatásra kerültek azok a kontaktszöget leíró formulák, amelyek stacionárius körülmények között alkalmazhatóak. Érdekes azonban azt is megvizsgálni, hogy hogyan alakul a kontaktszög értéke, ha a szerszám nem a kontúrral ekvidisztáns pályán halad. Ebben az esetben a szerszám és a munkadarab kapcsolódási viszonya pontról pontra változik még állandó görbületű kontúrgörbe esetén is. A kontaktszög alakulásának elemzéséhez vegyük alapul az egyenes kontúr mentén történő megmunkálás esetét, ahol az előtolási sebesség egy olyan \vec{v}^* vektor irányába mutat, amely az állandó állapotot biztosító \vec{v} vektorral α szöget zár be (lásd 2. ábra). Az α szög előjele legyen pozitív, ha a szerszám távolodik a kontúrtól, és legyen negatív, ha a szerszám közelít a kontúrhoz. A szerszámmel belépési pontja (C) ugyanaz marad, mint a kontúrpárhuzamos szerszámpálya esetében volt, viszont a szerszámmel kilépési pontja már változni fog. Jelölje ezt a pontot Q^* ! Tekintve, hogy $\vec{v} \perp \overline{PQ}$ és $\vec{v}^* \perp \overline{PQ^*}$, a \overline{PQ} és a $\overline{PQ^*}$ vektorok által bezárt szög megegyezik az α szöggel. Ebből adódóan a \vec{v}^* vektorral jelölt irányhoz tartozó kontaktszög meghatározható az ekvidisztáns pályákhoz tartozó (6)-os képlet alapján. A behelyettesítés során viszont az általános megmunkálásnál nehezen értelmezhető s oldallépés helyett az ábra alapján könnyen meghatározható $|\overline{AQ}|$ távolságot kell használni: $\theta^* = \theta(|\overline{AQ}|, \rho) - \alpha$. Ez az összefüggés hasonlóan levezethető lenne körívek esetére is.

Most pedig térjünk át a változó görbületű kontúrok mentén történő marás vizsgálatára!



2. ábra A kontaktszög alakulása állandó görbületű kontúrszakaszok általános megmunkálása esetén



3. ábra A kontaktszög alakulása változó görbületű kontúrszakaszok általános megmunkálása esetén

3. A KONTAKTSZÖG ALAKULÁSA VÁLTOZÓ GÖRBÜLETŰ KONTÚR MENTÉN

Amennyiben a kontúr egyenes és körív menti szakaszok láncolata, az előző fejezetben ismertetett összefüggések érvényesek maradnak, bár külön számításokat igényel annak meghatározása, hogy a szerszámpálya mely pontjainál lép át a szerszámél belépési pontja az egyik kontúrszegmensről a másikra. Viszont az általános alakú kontúrok esetén, ahol a kontúr görbületi sugara pontról pontra változik, még a kontúrpárhuzamos szerszámpályákhoz sem ismertek olyan explicit formulák, amelyekkel közvetlenül megadható volna a kontaktszög értéke. Ennek elemzésére tekintünk át a 3. ábrát!

Jelölje a $\bar{c}(t)$ paraméteres görbe a kontúr vonalát, és a $\bar{p}(t)$ paraméteres görbe a szerszám mozgáspályáját! A szerszám körvonalának, azaz a P középpontú r sugarú körnek, és a $\bar{c}(t)$ görbe még nem bejárt szakaszának a metszéspontja megadja a szerszámél belépési pontját, azaz a C pontot. Felhasználva, hogy $\bar{v} \perp \overline{PQ}$, a szerszámpálya P pontbeli érintőjének ($\bar{p}'(t)$) ismeretében kiszámolható a Q pont, azaz a szerszámél kilépési pontja, amelyből adódik a kontaktszög értéke: $\theta = \angle QPC$. Tekintve, hogy a metszéspont meghatározása gyakran nehézségekbe ütközik, a gyakorlatban inkább szimulációs módszereket alkalmaznak [3].

Általános kontúr esetén az állandó kontaktszöget biztosító szerszámpályák tervezésére ugyancsak a geometriai modellezés módszereit alkalmazzák [4]. Azonban a 3. ábra alapján felírható az a differenciálegyenlet, amely megadja az állandó kontaktszöget biztosító szerszámpálya alakját:

$$\bar{p}(t) = \bar{c}(t) + \begin{bmatrix} \cos\left(\frac{\pi}{2} + \theta\right) & -\sin\left(\frac{\pi}{2} + \theta\right) \\ \sin\left(\frac{\pi}{2} + \theta\right) & \cos\left(\frac{\pi}{2} + \theta\right) \end{bmatrix} \frac{r \bar{p}'(t)}{|\bar{p}'(t)|} \quad (8)$$

Ez a differenciálegyenlet csak egy görbesereget határoz meg. Ahhoz, hogy egy konkrét szerszámpályát kapjunk, meg kell adni a kontúr kezdőpontjához tartozó szerszámpozíciót. Ezt követően egy kezdeti érték problémaként tekinthetünk a (8)-as összefüggésre, amelynek numerikus megoldásáról az [5] forrásban részletesebb leírás található.

4. ÖSSZEFOGLALÁS

A cikkben bemutatásra kerültek azok a geometriai összefüggések, amelyek alapján meghatározható a kontaktszög értéke kontúrmarás esetén. Továbbá ismertetésre kerültek azok a módszerek is, amelyek segítségével létrehozható olyan szerszámpálya, ahol a kontaktszög adott értéket vesz fel. Ezen ismeretek alapján lehetővé válik a szerszámterhelés kontrollálása kontúrmarás során, ami kulcsfontosságú kérdésnek számít a megmunkálás hatékonyságának szempontjából.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Az előadó részvételét az OGÉT 2020 konferencián az NTP-HHTDK-19-0068 azonosítójú, "A hazai Tudományos Diákköri műhelyek és rendezvények támogatása" pályázat, a kutatási-fejlesztési munkát a 2017-1.3.1-VKE-2017-00029 azonosítójú, „Moduláris digitális gyártástechnológiai keretrendszer és szolgáltatások fejlesztése KKV-k számára” pályázat támogatta.

IRODALMI HIVATKOZÁSOK

- [1] T. R. Kramer, 'Pocket milling with tool engagement detection', *J. Manuf. Syst.*, vol. 11, no. 2, pp. 114–123, 1992, doi: 10.1016/0278-6125(92)90042-E.
- [2] K. W. Chan and H. S. Choy, 'Machining Tactics for Interior Corners of Pockets', *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 20, no. 10, pp. 741–748, 2002, doi: 10.1007/s001700200232.
- [3] F. Guerrero-Villar, R. Dorado-Vicente, P. Romero-Carrillo, R. López-García, and J. Mercado-Colmenero, 'Computation of Instantaneous Cutter Engagement in 2.5D Pocket Machining', *Procedia Eng.*, vol. 132, pp. 464–471, 2015, doi: 10.1016/j.proeng.2015.12.520.
- [4] A. Dumitrache, T. Borangiu, and A. Dogar, 'Automatic generation of milling toolpaths with tool engagement control for complex part geometry', presented at the IFAC Proceedings Volumes (IFAC-PapersOnline), 2010, vol. 10, pp. 252–257.
- [5] A. Jacso, G. Matyasi, and T. Szalay, 'The fast constant engagement offsetting method for generating milling tool paths', *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, May 2019, doi: 10.1007/s00170-019-03834-8.